

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **ZAVRŠNI RAD**

**Borna Doračić**

Zagreb, 2014.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# ZAVRŠNI RAD

Mentor:

Prof. dr. sc. Željko Bogdan, dipl. ing.

Student:

Borna Doračić

Zagreb, 2014.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof. dr. sc. Željku Bogdanu na ukazanoj pomoći i dostupnosti tijekom izrade ovoga rada.

Borna Doračić

## SADRŽAJ

POPIS SLIKA .....	II
POPIS TABLICA.....	III
POPIS OZNAKA .....	IV
SAŽETAK.....	V
SUMMARY .....	VI
1. UVOD .....	1
2. PROCJENA POTREBE ZA ELEKTRIČNOM ENERGIJOM U RAZDOBLJU OD 2010. DO 2030. GODINE .....	2
2.1. Procjena potrošnje električne energije .....	2
2.2. Potreba za električnom energijom.....	5
3. ANALIZA TEHNOLOGIJA ZA PROIZVODNJU ELEKTRIČNE ENERGIJE .....	8
3.1. Termoelektrana na ugljen.....	8
3.2. Kombinirana termoelektrana na plin.....	11
3.3 Nuklearna elektrana.....	13
3.4. Vjetroelektrana .....	16
4. PRORAČUN CIJENE ELEKTRIČNE ENERGIJE .....	18
4.1. Proračun cijene električne energije za termoelektranu na ugljen.....	20
4.2. Proračun cijene električne energije za kombiniranu termoelektranu na plin .....	21
4.3. Proračun cijene električne energije kod nuklearne elektrane.....	22
4.4 Proračun cijene električne energije kod vjetroelektrane .....	23
5. PRIJEDLOG IZGRADNJE ELEKTRANA.....	25
5.1. Prijedlog izgradnje elektrana od 2010. do 2020. godine.....	25
5.2. Prijedlog izgradnje elektrana od 2020. do 2030. godine.....	27
5.2.1. Nuklearni reaktor ATMEA 1 tvrtke Areva .....	27
6. ZAKLJUČAK .....	29
LITERATURA.....	30

**POPIS SLIKA**

Slika 1. Vrijednosti BDP-a od 1992. do 2011. godine i njihove linearizirane vrijednosti.....	2
Slika 2. Vrijednosti potrošnje električne energije od 1992. do 2011. godine i njihove linearizirane vrijednosti .....	3
Slika 3 Vrijednosti porasta potrošnje električne energije i BDP-a za linearni model.....	4
Slika 4. Ukupna proizvodnja električne energije u svijetu prema vrsti energenta .....	8
Slika 5. Proizvodnja prirodnog plina po stanovniku .....	11
Slika 6. Rizici od nesreća izazvanih ljudskim djelovanjem .....	15
Slika 7. Mapa potencijalnih lokacija za izgradnju termoelektrane na ugljen.....	26
Slika 8. Mapa potencijalnih lokacija za izgradnju kombinirane termoelektrane na plin .....	26
Slika 9. Mapa potencijalnih lokacija za izgradnju nuklearne elektrane na rijeci Savi.....	28

**POPIS TABLICA**

Tablica 1. Vrijednosti potrošnje električne energije od 2010. godine do 2030. godine.....	5
Tablica 2. Vrijeme izlaska iz pogona postojećih termoelektrana.....	6
Tablica 3. Usporedba srednjih vrijednosti troškova za 4 tipa elektrana.....	12
Tablica 4. Struktura troškova vjetroelektrane od 2 MW u Europi .....	17
Tablica 5. Ulazni podaci za proračun cijene električne energije za termoelektranu na ugljen	20
Tablica 6. Ulazni podaci za proračun cijene električne energije za kombiniranu.....	21
Tablica 7. Ulazni podaci za proračun cijene električne energije za nuklearnu elektranu .....	22
Tablica 8. Ulazni podaci za proračun cijene električne energije za vjetroelektranu .....	23

**POPIS OZNAKA**

<b>Oznaka</b>	<b>Jedinica</b>	<b>Opis</b>
$c_e$	€/kWh	Cijena proizvedene električne energije
$p$	%	Kamatna stopa za povrat uloženog kapitala u gradnju elektrane
$n$	godina	Broj godina povrata kredita
$N$	godina	Broj godina rada elektrane
$I_n$	€/kW	Jedinična investicija na pragu elektrane svedena na početak pogona (dakle s uključenim interkalarnim kamatama)
$c_{os}$	€/kW	Stalni troškovi pogona i održavanja, bez goriva po jedinici snage na pragu elektrane
$c_g$	€/kWh	Cijena goriva na pragu elektrane
$c_{op}$	€/kWh	Promjenjivi troškovi pogona i održavanja po jedinici proizvedene energije na pragu elektrane
$f_0$	%	Faktor iskorištenja instalirane snage
$a$	%	Diskontna stopa
$p_g$	%	Stopa porasta cijene goriva

## SAŽETAK

U ovom radu izvršena je usporedba tehnologija za proizvodnju električne energije za elektroenergetski sustav Republike Hrvatske i to za četiri tipa elektrana: elektranu na ugljen, kombiniranu elektranu na plinsko gorivo, nuklearnu elektranu i vjetroelektranu. U svrhu toga, proračunate su cijene električne energije za svaki od ova četiri tipa elektrana pri čemu je korišten program Microsoft Excel. Dobivene cijene su prikazane sa i bez uključenih eksternih troškova.

Kako bi se mogla pretpostaviti potreba za električnom energijom u sljedećih 20 godina u Republici Hrvatskoj, izvršena je analiza relevantnih podataka od 1992. godine pa do 2011. godine. Na taj način je dobiven oblik krivulje potrošnje električne energije koji je korišten za pretpostavljanje potrošnje električne energije od 2010. do 2030. godine.

U svrhu pokrivanja potrošnje električne energije u sljedećih 20 godina, dan je prijedlog potrebne snage i vrste elektrana koje moraju biti izgrađene.

Ključne riječi: termoelektrana na ugljen, termoelektrana na plin, nuklearna elektrana, vjetroelektrana, eksterni troškovi, cijena električne energije, potrošnja električne energije u Hrvatskoj, proizvodnja električne energije u Hrvatskoj



## **SUMMARY**

This thesis presents comparison of electricity production technologies for Croatian power producing system which includes four types of power plants: coal power plant, combined cycle power plant, nuclear power plant and wind power plant. For that reason, cost of electricity for each of the types mentioned was calculated. Costs of electricity are given with and without including external costs.

To assume the need for electricity in the next 20 years in Croatia, relevant data from 1992 to 2011 was analysed. To cover the electricity consumption in the next 20 years, types of the power plants and needed power output of the power plants is suggested in this thesis.

Key words: coal power plant, combined cycle power plant, nuclear power plant, wind power plant, cost of electricity, electricity consumption in Croatia, electricity production in Croatia

## 1. UVOD

Općenito je poznato da potrošnja električne energije raste u svijetu pa tako ista ta činjenica vrijedi i za Hrvatsku. Zadnjih 20 godina, potrošnja električne energije konstantno raste u Hrvatskoj te je sa vrijednosti 11,516 TWh u 1992. godini narasla na 18,528 TWh u 2011. godini. Pretpostavka je da će se u sljedećih 20 godina nastaviti rast što je i nužno za razvoj svake zemlje jer je dokazano da je porast potrošnje električne energije blisko povezan sa ekonomskim razvojem zemlje, odnosno s porastom bruto društvenog proizvoda (BDP). Odnos ovih dviju stopa porasta se naziva faktorom elastičnosti i on je blizak jedinici kod gotovo svih zemalja na svijetu [1].

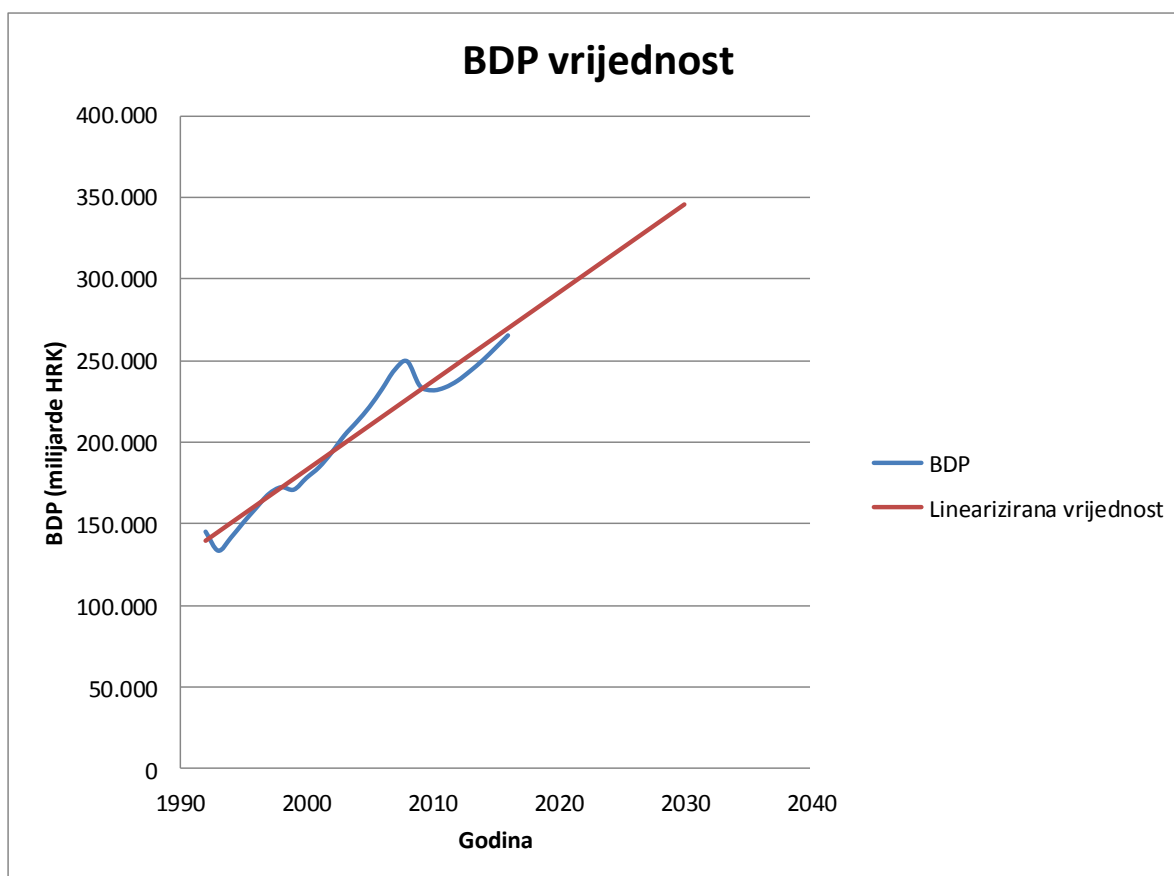
Iako potrošnja električne energije u Hrvatskoj iz godine u godinu raste, proizvodnja stagnira već dugi niz godina, tako da je u 2011. godini u svrhu pokrivanja ukupne potrošnje bilo uvezeno 8,73 TWh električne energije. Ovaj problem se treba ozbiljno shvatiti i potrebno je što prije početi graditi bazne elektrane koje ne samo da će morati pokrivati porast potrošnje električne energije nego će morati zamijeniti i proizvodne kapacitete velikog dijela postojećih elektrana kojima se bliži kraj radnog vijeka.

Cilj ovog rada je dobiti približnu vrijednost potrošnje električne energije do 2030. godine na temelju koje će se izračunati potrebna snaga budućih elektrana te napraviti tehnoekonomska analiza četiri tipa elektrana koji imaju najveći potencijal izgradnje.

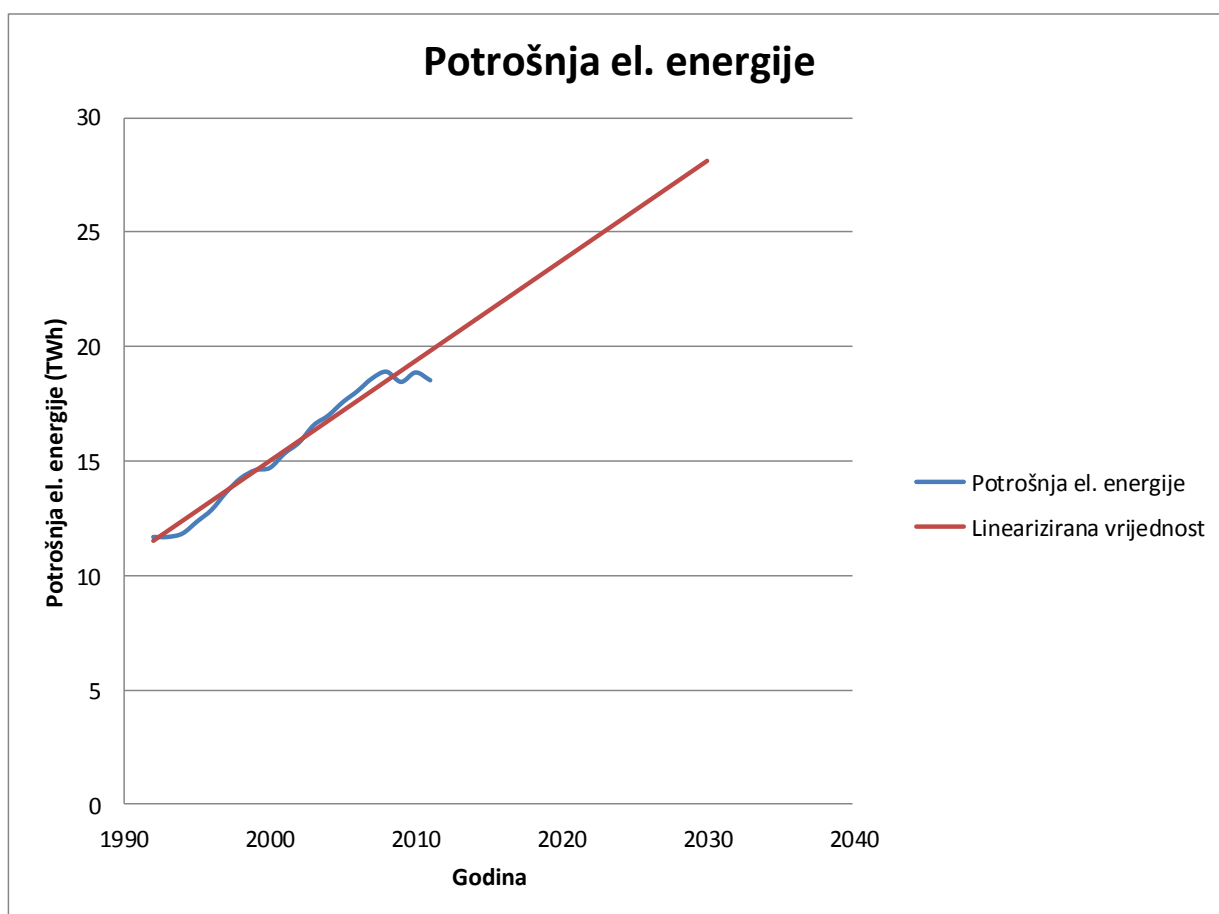
## 2. PROCJENA POTREBE ZA ELEKTRIČNOM ENERGIJOM U RAZDOBLJU OD 2010. DO 2030. GODINE

### 2.1. Procjena potrošnje električne energije

Kako bismo mogli procijeniti buduću potrošnju električne energije, najprije je potrebno vidjeti kako su se vrijednosti potrošnje električne energije zajedno s vrijednostima BDP-a kretale zadnjih 20 godina. U tu svrhu su korišteni podaci Međunarodne agencije za energiju za vrijednosti potrošnje električne energije [2] i podaci Međunarodnog monetarnog fonda za vrijednosti BDP-a [3]. Vrijednosti BDP-a su potrebne kako bi uočili da li se faktor elastičnosti nalazi u zahtijevanim granicama pri procjeni buduće potrošnje električne energije. Nakon što su podaci prikazani u dijagramu (Slika 1. i Slika 2.), možemo vidjeti da se dobivene krivulje mogu aproksimirati pravcem. Upravo na taj način će u ovom radu biti određena potrošnja električne energije u vremenskom rasponu od 2010. godine do 2030. godine.



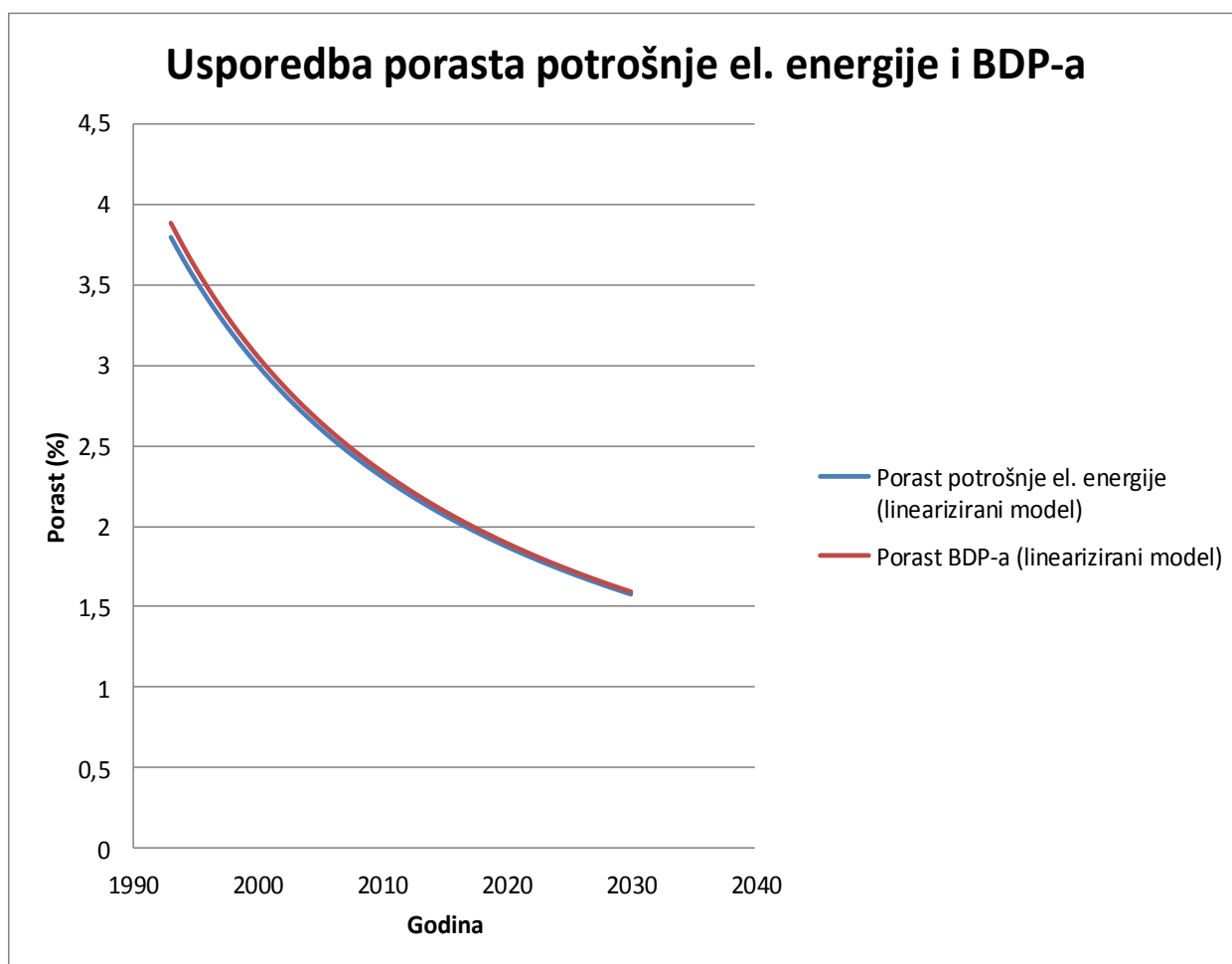
Slika 1. Vrijednosti BDP-a od 1992. do 2011. godine i njihove linearizirane vrijednosti



**Slika 2. Vrijednosti potrošnje električne energije od 1992. do 2011. godine i njihove linearizirane vrijednosti**

Nakon što su dobivene buduće vrijednosti BDP-a i potrošnje električne energije, potrebno je sagledati u kojim granicama se nalazi porast potrošnje električne energije za linearizirane vrijednosti te usporediti te vrijednosti s porastom lineariziranih vrijednosti BDP-a kako bi vidjeli nalazimo li se u dozvoljenim granicama faktora elastičnosti. Pregled vrijednosti porasta potrošnje električne energije je bitan i iz razloga što se mora provjeriti jesu li procijenjene linearizirane vrijednosti preoptimistične.

Vrijednosti porasta potrošnje električne energije bi trebale biti minimalno jednake vrijednostima porasta BDP-a za Hrvatsku, što je ustanovljeno analizom zemalja s ekonomskom situacijom sličnoj onoj u Hrvatskoj [1]. Kada se te vrijednosti unesu u dijagram (Slika 2.), vidi se da su te dvije vrijednosti gotovo identične te da blago padaju što zadovoljava oba uvjeta: da porast potrošnje električne energije mora biti minimalno jednak porastu BDP-a i da porast potrošnje električne energije nije preoptimistično pretpostavljen.



**Slika 3. Vrijednosti porasta potrošnje električne energije i BDP-a za linearni model**

Na ovaj način se dobivaju vrijednosti potrošnje električne energije koje se mogu prikazati u tablici (Tablica 1.) za vremensko razdoblje od 2010. godine do 2030. godine.

<b>Godina</b>	<b>Potrošnja el. energije (TWh)</b>
2010.	18,870
2015.	21,562
2020.	23,746
2025.	25,930
2030.	28,114

**Tablica 1. Vrijednosti potrošnje električne energije od 2010. godine do 2030. godine**

## **2.2. Potreba za električnom energijom**

Iz dobivenih vrijednosti se vidi da će do 2020. godine potrošnja električne energije narasti za oko 4,9 TWh u odnosu na vrijednost iz 2010. godine, a da će potrošnja električne energije 2030. godine narasti za oko 4,3 TWh u odnosu na vrijednost iz 2020. godine. To znači da će samo za pokrivanje povećanja potrošnje električne energije trebati osigurati 700-900 MW snage (ako pretpostavimo izgradnju elektrana sa faktorom iskorištenja snage od 0,6 do 0,8) od 2010. do 2020. godine i 600-800 MW snage za razdoblje od 2020. do 2030. godine. Ove vrijednosti ne uzimaju u obzir snagu koja će biti potrebna da nadomjesti elektrane koje izlaze iz pogona u danih 20 godina. U sljedećoj tablici (Tablica 2.) dan je prikaz termoelektrana koje izlaze iz pogona u razdoblju od 2010. do 2030. godine [4].

<b>Elektrana</b>	<b>Godina izlaska iz pogona</b>	<b>Snaga (MW)</b>
TETO Zagreb 1	2010.	25
TETO Zagreb 3	2011.	120
ELTO Zagreb 2	2011.	42,5
PTE Osijek	2012.	50
PTE Jertovec	2013.	85
TE Sisak 1	2014.	210
TETO Osijek	2016.	42
TE Plomin 1	2016.	105
TE Rijeka	2016.	320
TE Sisak 2	2018.	210
NE Krško	2023.	332
UKUPNO		1541,5

**Tablica 2. Vrijeme izlaska iz pogona postojećih termoelektrana [4]**

Kao što se vidi u priloženoj tablici, većina termoelektrana izlazi iz pogona do 2020. godine. Ukupna snaga termoelektrana koje izlaze iz pogona do 2020. godine iznosi 1209,5 MW pa je potrebno, uz izgradnju elektrana za pokrivanje povećanja potrošnje električne energije, zamijeniti i jedinice koje izlaze iz pogona. Ukupno bi trebalo osigurati 1900-2100 MW snage za razdoblje od 2010. do 2020. godine i 1000-1200 MW za razdoblje od 2020. godine do 2030. godine.

Ova situacija je prepoznata u Strategiji energetskeg razvoja Republike Hrvatske u kojoj se navodi potreba za izgradnjom baznih elektrana ukupne snage od barem 2400 MW do 2020. godine [5] (predviđanje potrošnje električne energije u Strategiji je optimističnije nego predviđanje koje je korišteno u ovom radu, ali pregledom stvarnih podataka jasno je da porast potrošnje električne energije u Strategiji nije realan). Nažalost, očito je da je napredak u pogledu planiranja i izgradnje baznih elektrana vrlo spor.

Važno je napomenuti da ukoliko se ne izgrade potrebne elektrane u zadanim vremenskim razdobljima, ovisnost Hrvatske o uvozu električne energije će postati još mnogo izraženija što može predstavljati veliki problem. Elektrane se u pravilu grade radi pokrivanja potrošnje električne energije u toj zemlji zbog čega se zalihe električne energije u ostalim zemljama smanjuju, što znači da će cijena električne energije koju izvoze samo rasti.

U daljnjem tekstu će biti prikazana tehnookonomska analiza četiri tipa elektrana: elektrane na ugljen, kombinirane elektrane na plinsko gorivo, nuklearne elektrane te vjetroelektrane.

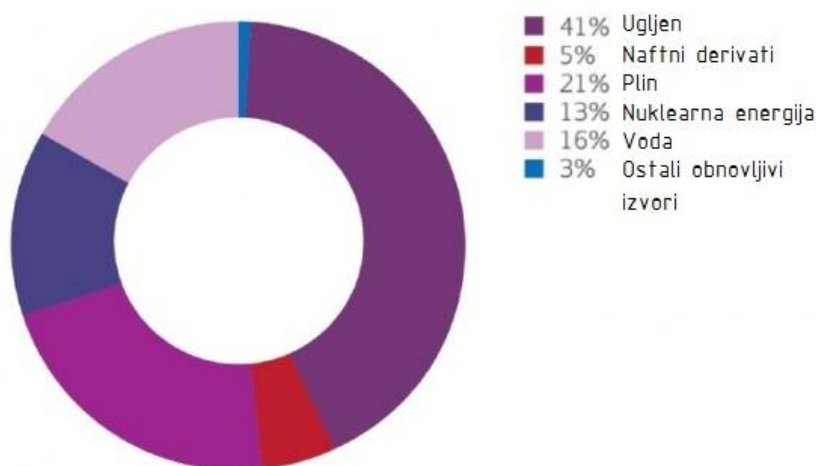


### 3. ANALIZA TEHNOLOGIJA ZA PROIZVODNJU ELEKTRIČNE ENERGIJE

Za pokrivanje povećane potrošnje električne energije u Republici Hrvatskoj u sljedećih 20 godina, biti će potrebno graditi bazne elektrane od kojih će u ovom radu biti opisane termoelektrana na ugljen, kombinirana termoelektrana na plin i nuklearna elektrana. Dodatno će biti provedena analiza vjetroelektrana koje su trenutno najzastupljenija vrsta stohastičkih (nepredvidivih) obnovljivih izvora električne energije.

#### 3.1. Termoelektrana na ugljen

U proizvodnji električne energije u svijetu, termoelektrane na ugljen su najzastupljenije sa 41 % (prema podacima iz 2009. godine). U nekim zemljama, termoelektrane na ugljen sudjeluju sa čak više od 90 % ukupne proizvodnje električne energije. Prema ovim podacima, vidi se da ugljen trenutno igra ključnu ulogu u proizvodnji električne energije (Slika 4.) [6].



Slika 4. Ukupna proizvodnja električne energije u svijetu prema vrsti energenta [6]

Raspoloživost ugljena kao energenta za iskorištenje u elektroenergetici nije upitna iz više razloga. Prvi razlog je taj što u svijetu općenito ima više ugljena nego ostalih fosilnih goriva, bolje rečeno, energetska vrijednost dosad utvrđenih zaliha ugljena u svijetu je mnogo veća od energetske vrijednosti zaliha drugih fosilnih goriva (42 000 EJ za ugljen nasuprot 6 100 EJ za plin i 5 900 EJ za tekuća goriva). Drugi razlog je to što je potrošnja ugljena manja od potrošnje tekućih i plinovitih goriva jer ugljen ne nailazi na veliku upotrebu izvan energetike, dok se, na primjer, plin koristi i u industriji i domaćinstvima. S obzirom na to da upravo ti potrošači teže podnose nedostatak plina, oni imaju prednost u odnosu na potrebe elektroenergetike. Ugljen koji se preferira za upotrebu je onaj s visokom kaloričnom vrijednošću (kameni ugljen) i s malim sadržajem sumpora (1-2 % ili niže) [1].

Postoje tri glavna izvora troškova kod termoelektrane na ugljen:

1. Investicijski troškovi koji predstavljaju troškove izgradnje elektrane (specifična investicija s interkalarnim kamatama za termoelektranu na ugljen iznosi oko 2 500 €/kW). Investicijski troškovi rastu smanjivanjem instalirane snage elektrane.
2. Troškovi pogona i održavanja koji uključuju zapošljavanje radnika koji upravljaju postrojenjem, kao i troškovi popravaka i održavanja tijekom životnog vijeka elektrane (stalni troškovi pogona i održavanja za termoelektranu na ugljen se kreću oko 70 €/kW godišnje).
3. Troškovi goriva, ili bolje rečeno, cijena goriva (cijena ugljena se kreće oko 3,5 €/GJ) [7].

Važno je napomenuti da u Hrvatskoj ne postoji ugljen zahtijevane kvalitete za izgaranje u termoelektrani na ugljen pa se ugljen za te potrebe mora uvoziti.

Učinkovitost pretvorbe toplinske u električnu energiju je kod starih postrojenja (20-40 godina) koja su imala podkritične parametre pare (530-540 °C i 140-180 bar) iznosila 36-39 % dok kod postrojenja koja se danas grade ona iznosi 43-47 %. Za najnovija postrojenja s nadkritičnim parametrima pare (>600 °C i >300 bar) se predviđa učinkovitost pretvorbe toplinske u električnu energiju iznad 50 % [8].

Jedna od glavnih mana termoelektrane na ugljen su visoki eksterni troškovi. Eksterni troškovi predstavljaju nekompenzirane štete koje se javljaju kao neželjene posljedice proizvodnje električne energije, odnosno, oni predstavljaju način kvantificiranja utjecaja elektrana na okoliš [9]. Kod svih tipova elektrana, gradnja i pogon nepovoljno utječu na prirodni okoliš no taj utjecaj ovisi o vrsti elektrane pa se taj faktor treba uzeti u obzir kod planiranja i gradnje postrojenja. Samim time, kao problem se javlja i nepovoljan prihvrat ovih elektrana u javnosti. Oko 9 milijardi tona CO<sub>2</sub> se proizvodi i ispušta u atmosferu izgaranjem ugljena od čega se 70% odnosi na proizvodnju električne energije. Jedna od glavnih mogućnosti smanjenja eksternih troškova uključuje zamjenu starih postrojenja (s podkritičnim parametrima i nižim stupnjevima iskoristivosti) s novim postrojenjima koja imaju nadkritične parametre i visoke stupnjeve iskoristivosti. Pretpostavlja se da bi se samo zamjenom starih postrojenja s novima godišnje emisije CO<sub>2</sub> smanjile za 1,9 milijardi tona [8]. Izgradnju budućih termoelektrana na ugljen u Hrvatskoj bi trebalo planirati uzimajući u obzir jednu od tehnologija „čistog ugljena“, a jedne od najčešće spominjanih su izgaranje u fluidiziranom sloju i integrirano rasplinjavanje ugljena. Pri tome treba imati na umu da spomenute nove tehnologije neće bitno odudarati u smislu investicija od klasičnih postrojenja [1].

Kod izgaranja u fluidiziranom sloju, brzina upuhivanja zraka kroz rešetku je dovoljno velika da se čestice ugljena podižu s rešetke i izgaraju u fluidiziranom sloju. Na ovaj način se postiže dobro miješanje goriva i zraka i izgaranje pri relativno niskim temperaturama (850-900 °C) što stvara male količine NO<sub>x</sub> i smanjuje zašljakivanje.

Rasplinjavanje ugljena je tehnologija koja se koristi u sklopu kombiniranog postrojenja plinske i parne turbine pri čemu se ugljen ne spaljuje potpuno već se rasplinjava uz nedostatak kisika te u reakciji s vodom stvara sintetski plin bogat vodikom koji onda izgara u tipičnom kombiniranom plinsko-parnom postrojenju. Ova tehnologija je još u fazi razvoja, a stupanj iskoristivosti koji se očekuje od ovih postrojenja iznosi 50-60% [8].

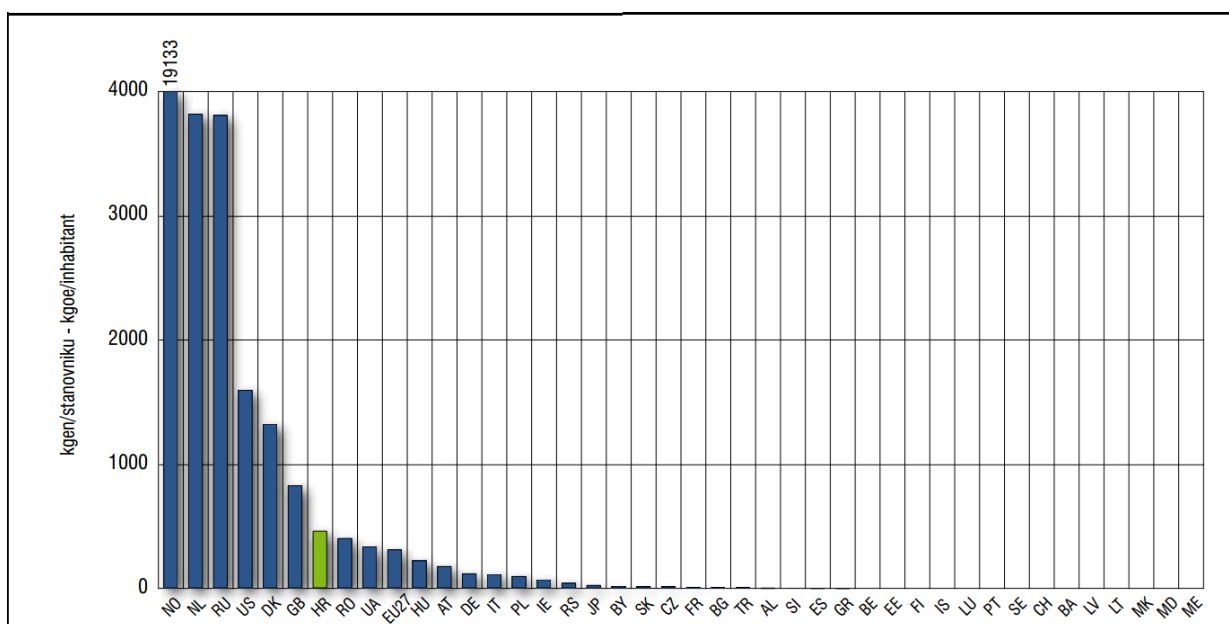
Najpovoljniji smještaj termoelektrana na ugljen bi bio na morskoj obali iz razloga što će uvozni ugljen u Hrvatsku dolaziti morskim putem pa neće postojati dodatni troškovi prijevoza ugljena od morske luke do elektrane. Također, prednost smještanja elektrana na morskoj obali je i u tome što se morska voda može koristiti za odvođenje otpadne topline [1].

Jasno, ovakav prijedlog bi naišao na vrlo veliki otpor turističkih organizacija te lokalnog stanovništva (makar, gdje god da se gradi termoelektrana na ugljen, uvijek će postojati otpor lokalnog stanovništva). Ako se elektrana neće graditi na morskoj obali, hlađenje će morati biti vršeno rashladnim tornjevima.

### 3.2. Kombinirana termoelektrana na plin

Prednosti plinskih goriva u odnosu na kruta i tekuća su što se vrlo lako miješaju s zrakom, nije im potrebna posebna priprema, te izgaraju s vrlo malim pretičkom zraka što utječe na smanjenje količine dimnih plinova koji odlaze u okoliš s relativno visokom temperaturom. Plinska goriva izgaraju gotovo potpuno, bez štetnih ostataka kao što su čađa, ugljikov monoksid, sumporov dioksid i pepeo. Kao što se iz navedenih svojstava vidi, plin je superiornije gorivo od ugljena i zbog toga je znatno skuplje.

Hrvatska trenutno dio potrošnje plina pokriva iz vlastitih izvora, a dio iz uvoza, ali će se buduće povećanje potrošnje plina moći pokriti jedino dodatnim uvozom pri čemu se pretpostavlja da će uvoz u 2030. godini iznositi barem 50 % potrošnje plina [1]. Na sljedećoj slici se može vidjeti proizvodnja plina u Hrvatskoj u 2011. godini po stanovniku, u usporedbi s 41 europskom zemljom, uključujući Europsku uniju (EU27), SAD i Japan [10].



Slika 5. Proizvodnja prirodnog plina po stanovniku [10]

Jedan od nedostataka plina je što su njegove zalihe vrlo neravnomjerno raspoređene u svijetu pri čemu se oko 70 % dokazanih svjetskih zaliha plina nalazi na području Rusije i Bliskog istoka dok Zapadna Europa i Sjeverna Amerika, koje su glavni potrošači plina raspolažu s puno manjim zalihama. Ova činjenica je uzrok tome da može doći do nedostatka plina u određenim zemljama kojima se plin dostavlja plinovodima radi političkih previranja između zemalja kroz koje prolaze cjevovodi. Način na koji se ovaj problem može djelomično kompenzirati je uvozom ukapljenog plina (LNG) iz zemalja Bliskog istoka što svakako pokazuje prednost izgradnje LNG terminala na nekoj od lokacija u sjevernom Jadranu [1].

Jedna od prednosti kombiniranih termoelektrana na plin u odnosu na termoelektanu na ugljen je da su mnogo niži investicijski troškovi, koji s interkalarnim kamatama iznose oko 650 €/kW. Ovi troškovi su niži i od investicijskih troškova nuklearnih elektrana i vjetroelektrana. Od ostalih troškova, stalni troškovi pogona i održavanja se kreću u vrijednostima od oko 25 €/kW, iz čega vidimo da je i taj dio troškova osjetno niži u odnosu na termoelektanu na ugljen i nuklearne elektrane dok su ti troškovi nešto malo viši kod vjetroelektrana. Cijena plina je s druge strane za oko 4 puta viša od cijene ugljena i oko 15 puta viša od cijene urana te iznosi oko 12 €/GJ. Cijena plina je ujedno glavni nedostatak gradnje kombinirane termoelektane na plin u odnosu na druge tipove elektrana. Uzroci povećanja cijene plina mogu uključivati manjkove na tržištu zbog realne mogućnosti kašnjenja izgradnje plinovoda za pokriće narasle potrošnje plina u Europi, konačne troškove gradnje plinovoda te takse tranzitnih država [1]. Na sljedećoj slici (Slika 4.) je prikazana usporedba srednjih vrijednosti specifičnih investicijskih troškova (s interkalarnim kamatama), stalnih troškova pogona i održavanja i cijene goriva za četiri tipa elektrana koje se analiziraju u ovom radu.

Vrsta elektrane	TE ugljen	TE plin (kombinirani ciklus)	Nuklearna elektrana	Vjetroelektrana
Stalni troškovi pogona i održavanja (€/kW, god)	70	25	200	30
Cijena goriva €/GJ	3,46	11,61	0,7	0
Specifična investicija (€/kW)	2500	650	3500	1350

**Tablica 3. Usporedba srednjih vrijednosti troškova za 4 tipa elektrana**

Učinkovitost pretvorbe toplinske u električnu energiju za ova postrojenja iznosi i do 60 %, što je puno više od ostalih tipova elektrana koje se analiziraju u ovom radu. Osim vrlo dobre iskoristivosti te niskih investicijskih i pogonskih troškova, ostale prednosti ovih postrojenja su niski prostorni zahtjevi, kratko vrijeme izgradnje (postrojenje od 800 MW se gradi 22 mjeseca) te mnogo niža emisija CO<sub>2</sub> od termoelektrani na ugljen (zbog visoke iskoristivosti i samim time niže potrošnje goriva te zbog niskog sadržaja ugljika u prirodnom plinu) što rezultira znatno nižim eksternim troškovima u odnosu na termoelektrane na ugljen, ali višim eksternim troškovima u odnosu na nuklearne elektrane i vjetroelektrane [1].

### 3.3 Nuklearna elektrana

Reakcija fisije izotopa urana proizvodi mnogo više energije po jedinici mase goriva od bilo kojeg drugog izvora energije, što predstavlja najveću privlačnost ove tehnologije. Gorive šipke nuklearnog reaktora su napunjene uranovim oksidom u obliku tableta, a jedna ta tableta sadrži količinu energije koliko i 480 m<sup>3</sup> prirodnog plina ili 807 kg ugljena. U svijetu trenutno postoji 435 nuklearnih elektrana u pogonu ukupne instalirane snage 374 335 MW (od čega najviše u SAD, Francuskoj, Japanu i Rusiji), dok ih je 71 u izgradnji (od čega najviše u Kini, Indiji i Rusiji) [11].

Korištenje nuklearne energije za proizvodnju električne energije je naglo ekspandiralo u šezdesetim godinama prošlog stoljeća, kada se smatralo da je trošak izgradnje nuklearne elektrane i kupnje urana manji od troškova za elektrane na fosilna goriva. U 1970-im godinama je dodatno poraslo korištenje nuklearne energije zbog naglog rasta cijena fosilnih goriva. Međutim, u 1980-im godinama su cijene izgradnje nuklearne elektrane poprilično porasle zbog sve većih sigurnosnih zahtjeva koji su pred njih bili postavljeni (naročito nakon nesreće na Otoku Tri Milje u Pennsylvaniji 1979. godine i katastrofe u Černobilu u Ukrajini 1986. godine). Problem je bio i u tome što u početnim studijama izvodljivosti nisu uzeti u obzir troškovi dekomisije i troškovi izgradnje sigurnih odlagališta nuklearnog otpada. U 1990-im godinama je razvoj nuklearne energetike gotovo stao, ali početkom 21. stoljeća se razvoj ponovo nastavlja jer se prednosti ovog načina proizvodnje električne energije prepoznaju u smislu smanjivanja emisija stakleničkih plinova (nuklearne elektrane ne proizvode stakleničke plinove niti kisele kiše za razliku od ugljenih elektrana i u manjoj mjeri plinskih) [12].

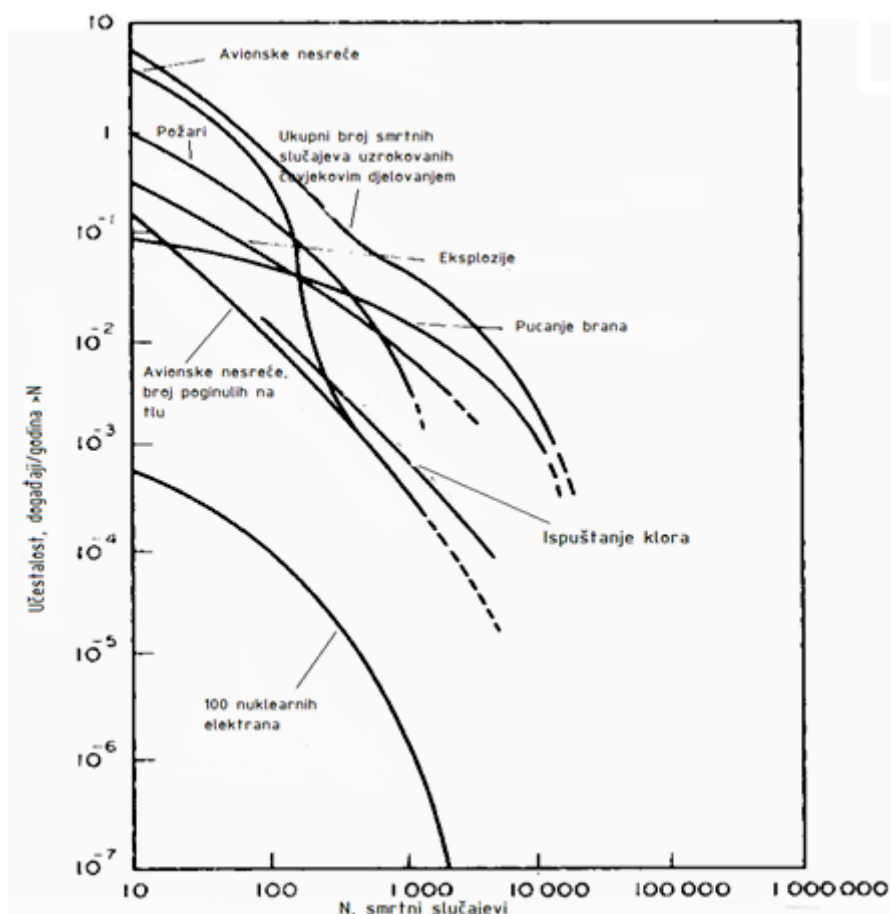
Ranije su već spomenuti nedostaci termoelektrana na ugljen i kombiniranih termoelektrana na plin. Pošto domaćinstva i industrija imaju prednost pred elektroenergetikom u pogledu korištenja plina, potrebno je racionalizirati korištenje plina u elektroenergetske svrhe. Ugljen se s druge strane i dalje primarno koristi za proizvodnju električne energije, ali proizvodnja stakleničkih plinova i kiselih kiša predstavlja veliki problem. Većina hidropotencijala je već odavno iskorištena u svim ekonomski isplativim područjima dok ostali obnovljivi izvori čine samo dopunu za pokrivanje bazne potrošnje te zauzimaju veliku površinu i nesiguran su izvor električne energije (ovise o vjetru/suncu).

Kod nuklearnih elektrana, s druge strane, ne postoji proizvodnja stakleničkih plinova, radni vijek elektrana je dugačak (40-60 godina), proizvodnja je stabilna i površina koju elektrane zauzimaju je malena. Što se tiče tržišta urana, ono je daleko stabilnije u odnosu na fosilna goriva, što utječe na sigurnost isporuke i konkurentnost cijene električne energije proizvedene u nuklearnim elektranama.

Što se tiče troškova nuklearne elektrane, investicijski troškovi su poprilično veći od ostalih tipova elektrana koji se analiziraju u ovom radu (Slika 4.) te oni mogu pridonijeti i sa 70-80 % u cijeni električne energije proizvedene u nuklearnim elektranama. Specifična investicija s interkalarnim kamatama iznosi oko 3500 €/kW. S druge strane, cijena goriva kod nuklearnih elektrana se kreće oko 0,7 €/GJ te je znatno manja od cijene goriva kod ostalih tipova elektrana, isključujući vjetroelektrane kod kojih je izvor energije (vjetar) besplatan. Potrebno je još spomenuti i stalne troškove pogona i održavanja koji su, kao i investicijski troškovi, poprilično veći od ostalih tipova elektrana. Također, važno je napomenuti da kod nuklearnih elektrana, troškove povećavaju dekomisija i odlaganje nuklearnog otpada koji se kreću u vrijednostima 10-15 % investicijskih troškova [12].

Trenutačno je najveća mogućnost izgradnje nuklearnih reaktora treće generacije, iako u izgradnji već postoje i reaktori 3+ generacije (European Pressurised Reactor u Francuskoj). Nuklearni reaktori treće generacije ustvari predstavljaju standardne reaktore druge generacije (PWR, BWR, AGR, itd.) koji uključuju određena poboljšanja. Neka od tih poboljšanja su povećani stupanj iskoristivosti, poboljšana sigurnost te standardizirani dizajn koji smanjuje investicijske troškove i troškove održavanja [13].

Sigurnost pogona elektrane je vrlo bitan parametar kod razvoja novih vrsta nuklearnih reaktora, iako u zadnje vrijeme se još važnijim uzima otežavanje terorističkih napada i proliferacije nuklearnih materijala. Nažalost, nuklearne elektrane nailaze na veliki otpor javnosti, najviše iz straha stanovništva od ispuštanja radioaktivnih elemenata pri pogonu ili ponavljanja katastrofe velikih razmjera poput one iz Černobila 1986. godine. Kod planiranja izgradnje nuklearne elektrane, biti će potrebno provesti edukaciju stanovništva kako bi se shvatila potreba za proizvodnjom električne energije iz nuklearne elektrane. Pogonska sigurnost današnjih izvedbi nuklearnih elektrana je na iznimno visokoj razini. Prema studiji provedenoj u SAD 1974. godine, jedna nuklearna elektrana je otprilike opasna kao jedan automobil (Slika 6.). Potrebno je napomenuti da su današnje nuklearne elektrane još mnogo sigurnije od elektrana koje su bile u pogonu 1974, godine kada je izvršena spomenuta studija.



**Slika 6. Rizici od nesreća izazvanih ljudskim djelovanjem**



Veliki problem kod planiranja izgradnje nuklearne elektrane kao i termoelektrane na ugljen u Hrvatskoj, predstavlja privremena administrativna zabrana pripremnih radova za ova dva tipa elektrana do 2015. godine. To predstavlja neopravdano nepovoljan utjecaj na planove gradnje elektrana do 2015. godine [1]. Zaključno, bitno je spomenuti da izgradnja nuklearne elektrane u Hrvatskoj omogućava ispunjenje obveze o smanjenju emisije CO<sub>2</sub> koju je Hrvatska preuzela potpisivanjem sporazuma iz Kyota.

### 3.4. Vjetroelektrana

Vjetroelektrane spadaju pod stohastičke obnovljive izvore energije što znači da proizvodnja električne energije na ovaj način ovisi o tome da li vjetar puše u određenom trenutku i kolikom brzinom puše. Iz tog razloga, da bi vjetroelektrana bila ekonomski isplativa, potrebno je pomno planiranje lokacije za izgradnju ovog tipa elektrane. Proizvodnja električne energije kod vjetroelektrana raste s trećom potencijom povećanja brzine vjetra. Brzina vjetra raste porastom visine pri čemu je tipično brzina vjetra na 50 metara visine za 25 % veća u odnosu na brzinu vjetra na 10 metara visine. Jasno, vjetroelektrane mogu raditi samo u određenim granicama brzine vjetra jer pri preniskim brzinama vjetra, lopatice se neće okretati, a pri previsokim brzinama vjetra se vjetroelektrane gasе kako ne bi došlo do oštećenja.

Za razliku od konvencionalnih termoelektrana na fosilna goriva kod kojih 40-70 % ukupnih troškova su troškovi pogona i održavanja te troškovi goriva, kod vjetroelektrana 75 % ukupnih troškova se odnosi na investicijske troškove koji su viši od plinske termoelektrane, ali niži od nuklearne i ugljene elektrane (Slika 4.). Stalni troškovi pogona i održavanja se kreću oko 30 €/kW godišnje i uglavnom su manji od ostalih tipova elektrana. Na sljedećoj tablici se može vidjeti udio raznih troškova u ukupnom investicijskom trošku elektrane [14].

	Udio u ukupnom trošku (%)
Turbina	75,6
Spoj na mrežu	8,9
Temelji	6,5
Zemljište	3,9
Električne instalacije	1,5
Konzultacije	1,2
Financijski troškovi	1,2
Izgradnja ceste	0,9
Kontrolni sustavi	0,3

**Tablica 4. Struktura troškova vjetroelektrane od 2 MW u Europi [14]**

Iz već spomenutih razloga što proizvodnja električne energije kod vjetroelektrana ovisi o tome da li vjetar puše u određenom trenutku i kolikom brzinom puše, faktor iskorištenja instalirane snage je mnogo manji od ostalih tipova elektrana te na najboljim lokacijama ne prelazi vrijednost od 30 %. Veliki nedostatak ovih elektrana je i činjenica da one zauzimaju veliki prostor jer minimalna udaljenost između dviju vjetroturbina mora iznositi pet promjera rotora vjetroturbine. Veći faktor iskorištenja instalirane snage se postiže pri izgradnji vjetroelektrana na morskoj pučini, gdje činjenica da zauzimaju veliki prostor više nije toliko bitna. Nažalost, ovaj način gradnje vjetroelektrana je primjenjiv na zapadu Europe (obala Atlantika) dok u Hrvatskoj takav koncept još nije isproban. Također, iako su vjetroelektrane obnovljivi izvori energije, one često nailaze na otpor lokalnog stanovništva zbog buke koju proizvode i koja se osjeti u njihovoj blizini, predstavljaju opasnost za životinje koje obitavaju u okolini (prvenstveno ptice, šišmiši, itd.), te mnogi ljudi smatraju da narušavaju izgled okoliša.

#### 4. PRORAČUN CIJENE ELEKTRIČNE ENERGIJE

U ovom poglavlju će se prikazati proračun cijene električne energije za svaki od četiri tipa elektrana koje se obrađuju u ovom radu jer je temeljni pokazatelj konkurentnosti kandidata za gradnju prosječna cijena proizvedene električne energije tijekom životne dobi uzevši u obzir očekivano povećanje cijene goriva i cijenu utjecaja na okoliš. Za ovu svrhu će se koristiti metoda proračuna prosječne diskontirane cijene proizvedene energije na pragu elektrane, dobivene kao odnos diskontiranih troškova i diskontirane dobiti u životnoj dobi elektrane [1].

Najprije će biti proračunata cijena bez eksternih troškova, a zatim će se uključiti i eksterni troškovi u proračun. Proračun će se vršiti po sljedećoj formuli:

$$c_e = \frac{1}{8760f_0} \left[ \frac{I_n p}{1 - (1 + p)^{-n}} \frac{\sum_{k=1}^n \frac{1}{(1 + a)^k}}{\sum_{k=1}^N \frac{1}{(1 + a)^k}} c_{os} \right] + c_g \frac{\sum_{k=1}^N \frac{(1 + p_g)^k}{(1 + a)^k}}{\sum_{k=1}^N \frac{1}{(1 + a)^k}} + c_{op} \quad (1)$$

gdje je,

$c_e$  – cijena proizvedene električne energije (€centi/kWh)

$p$  – kamatna stopa za povrat uloženog kapitala u gradnju elektrane

$n$  – broj godina povrata kredita

$N$  – broj godina rada elektrane

$I_n$  – jedinična investicija na pragu elektrane (€centi/kW) svedena na početak pogona (dakle s uključenim interkalarnim kamatama)

$c_{os}$  – stalni troškovi pogona i održavanja, bez goriva, po jedinici snage na pragu elektrane (€centi/kW)

$c_g$  – cijena goriva (€centi/kWh) na pragu elektrane

$c_{op}$  – promjenjivi troškovi pogona i održavanja po jedinici proizvedene energije na pragu elektrane (€centi/kWh)

$f_0$  – faktor iskorištenja instalirane snage

$a$  – diskontna stopa

$p_g$  – stopa porasta cijene goriva

Ovakav oblik formule ne uključuje eksterne troškove u proračun. Ukoliko se proračun želi izvršiti s uključenim eksternim troškovima, jednostavno se na izračunatu cijenu električne energije doda vrijednost eksternih troškova.

Proračun se vršio u programu Microsoft Excel, pri čemu je korišten pojednostavljeni oblik proračuna gdje su korištene srednje vrijednosti relevantnih ulaznih podataka. Srednje vrijednosti ulaznih podataka su odabrane prema [1] i u dogovoru s mentorom, te su uvrštene u jednadžbu (1).

U daljnjem tekstu će biti prikazani rezultati cijene električne energije dobiveni proračunom za svaki od navedenih četiri tipa elektrana:

- 1) termoelektrana na ugljen
- 2) kombinirana termoelektrana na plin
- 3) nuklearna elektrana
- 4) vjetroelektrana

#### 4.1. Proračun cijene električne energije za termoelektranu na ugljen

U prethodnim poglavljima su već spomenute srednje vrijednosti troškova za termoelektranu na ugljen, a svi ostali relevantni podaci za proračun se mogu vidjeti u sljedećoj tablici (Tablica 5.)

Vrsta elektrane	TE ugljen
Stalni troškovi pogona i održavanja (€cent/kW, god)	7000
Cijena goriva (€cent/kWh)	1,25
Specifična investicija (€cent/kW)	210000
Promjenjivi troškovi pogona i održavanja (€cent/kWh)	0,4
Radni vijek elektrane (god)	40
Razdoblje otplate kredita (god)	15
Prosječne kamate na kredite	0,065
Diskontna stopa	0,08
Pretpostavljena prosječna stopa porasta cijene goriva	0,025
Učinkovitost pretvorbe toplinske u el enegiju	0,42
Prosječno iskorištenje instalirane snage	0,8

**Tablica 5. Ulazni podaci za proračun cijene električne energije za termoelektranu na ugljen**

Kao što je vidljivo iz tablice, svi troškovi moraju biti zadani u centima, ako se kao krajnji rezultat želi dobiti cijena električne energije u centima. Ostale vrijednosti su zadane u postocima, a u proračun se unose kao brojčane vrijednosti. Za svaki tip elektrane je uzeta jednaka vrijednost prosječnih kamata na kredite od 6,5 % te jednaka vrijednost diskontne stope od 8 %. Za vrijednost učinkovitosti pretvorbe toplinske u električnu energiju je uzeta vrijednost od 42 %, iako su kod najmodernijih termoelektrana na ugljen te vrijednosti i više.

Za svaku elektranu analiziranu u ovom radu uzeto je razdoblje od 15 godina za otplatu kredita. Prosječno iskorištenje instalirane snage kod termoelektrana na ugljen je vrlo dobro te se kreće oko 80 %.

Kada se ovi podaci uvrste u jednadžbu (1), dobiva se srednja vrijednost cijene proizvedene električne energije od 5,39 €cent/kWh. Eksterni troškovi za termoelektranu na ugljen prema [15] iznose 5,9 €cent/kWh te kada se uvrste u jednadžbu (1), dobiva se cijena električne energije s uključenim eksternim troškovima od 11,29 €cent/kWh.

#### 4.2. Proračun cijene električne energije za kombiniranu termoelektranu na plin

Početni podaci za proračun cijene električne energije za kombiniranu termoelektranu na plin se mogu vidjeti u sljedećoj tablici (Tablica 6.).

Vrsta elektrane	TE plin (kombinirani ciklus)
Stalni troškovi pogona i održavanja (€cent/kW, god)	2500
Cijena goriva €cent/kWh	4,18
Specifična investicija (€cent/kW)	65000
Promjenjivi troškovi pogona i održavanja (€cent/kWh)	0,25
Radni vijek elektrane (god)	25
Razdoblje otplate kredita (god)	15
Prosječne kamate na kredite	0,065
Diskontna stopa	0,08
Pretpostavljena prosječna stopa porasta cijene goriva	0,06
Učinkovitost pretvorbe toplinske u el enegiju	0,58
Prosječno iskorištenje instalirane snage	0,5

**Tablica 6. Ulazni podaci za proračun cijene električne energije za kombiniranu termoelektranu na plin**

Radni vijek kombinirane termoelektrane na plin je manji od termoelektrane na ugljen te iznosi 25 godina, dok je pretpostavljena prosječna stopa porasta cijene goriva u životnom vijeku elektrane puno viša od termoelektrane na ugljen te je za nju uzeta vrijednost od 6 %. Ovako visoka pretpostavljena prosječna stopa porasta cijene goriva je razumna kada se uzmu u obzir činjenice o cijeni plina obrađivane u trećem poglavlju ovog rada.

Prosječno iskorištenje instalirane snage se uzima nižim nego kod termoelektrane na ugljen iz razloga što je cijena goriva kod kombinirane termoelektrane na plin veća nego kod ugljene termoelektrane. Kada se ulazni podaci uvrste u jednadžbu (1), dobiva se cijena električne energije za kombiniranu termoelektranu na plin od 9,83 €cent/kWh.

Vidi se da je cijena električne energije viša nego kod termoelektrane na ugljen, a najveći razlog tome je mnogo veća cijena plina u odnosu na cijenu ugljena.

Srednja vrijednost eksternih troškova iznosi oko 2 €cent/kWh [16], što daje cijenu električne energije kod kombinirane termoelektrane na plin s uključenim eksternim troškovima od 11,83 €cent/kWh. Iz ovoga se može vidjeti da, iako je cijena električne energije kod kombinirane termoelektrane na plin bez uključenih eksternih troškova dosta veća od cijene kod termoelektrane na ugljen, niski eksterni troškovi kod kombiniranog postrojenja rezultiraju malim razlikama u cijenama električne energije kod ova dva postrojenja kada se uključe eksterni troškovi.

#### 4.3. Proračun cijene električne energije kod nuklearne elektrane

Početni podaci za proračun cijene električne energije za nuklearnu elektranu se mogu vidjeti u sljedećoj tablici (Tablica 7.).

Vrsta elektrane	Nuklearna elektrana
Stalni troškovi pogona i održavanja (€cent/kW,god)	20000
Cijena goriva (€cent/kWh)	0,252
Specifična investicija (€cent/kW)	350000
Promjenjivi troškovi pogona i održavanja (€cent/kWh)	0,95
Radni vijek elektrane (god)	40
Razdoblje otplate kredita (god)	15
Prosječne kamate na kredite	0,065
Diskontna stopa	0,08
Pretpostavljena prosječna stopa porasta cijene goriva	0,01
Učinkovitost pretvorbe toplinske u el enegiju	0,34
Prosječno iskorištenje instalirane snage	0,85

Tablica 7. Ulazni podaci za proračun cijene električne energije za nuklearnu elektranu

Uzet je radni vijek elektrane od 40 godina, makar treba napomenuti da nuklearne elektrane mogu imati i dulji radni vijek (do 60 godina). Prosječno iskorištenje instalirane snage je kod ovih elektrana vrlo visoko te je uzeta vrijednost od 85 %. Pretpostavljena prosječna stopa porasta cijene goriva u životnom vijeku elektrane se uzima nižom od termoelektrane na ugljen zbog čega je odabrana vrijednost 1 %.

Kada se ulazni podaci za nuklearnu elektranu uvrste u jednadžbu (1), dobiva se cijena električne energije bez eksternih troškova od 6,31 €cent/kWh.

Iz tog rezultata se vidi da unatoč vrlo visokim investicijskim troškovima i troškovima održavanja, ove elektrane su konkurentne što se tiče cijene električne energije. Najveći razlog tome je vrlo niska cijena goriva kod nuklearnih elektrana. Dodavanjem eksternih troškova u jednadžbu (1), koji su kod ovih elektrana vrlo niski i iznose oko 0,6 €cent/kWh [16], cijena električne energije raste na 6,91 €cent/kWh te je osjetno niža od termoelektrane na ugljen i kombinirane termoelektrane na plin.

#### 4.4 Proračun cijene električne energije kod vjetroelektrane

Početni podaci za proračun cijene električne energije za vjetroelektoranu se mogu vidjeti u sljedećoj tablici (Tablica 8.).

Vrsta elektrane	Vjetroelektrana
Stalni troškovi pogona i održavanja (€cent/kW, god)	3000
Cijena goriva (€cent/kWh)	0
Specifična investicija (€cent/kW)	180000
Promjenjivi troškovi pogona i održavanja (€cent/kWh)	0,35
Radni vijek elektrane (god)	20
Razdoblje otplate kredita (god)	15
Prosječne kamate na kredite	0,065
Diskontna stopa	0,08
Pretpostavljena prosječna stopa porasta cijene goriva	0
Učinkovitost pretvorbe toplinske u el enegiju	0
Prosječno iskorištenje instalirane snage	0,28

**Tablica 8. Ulazni podaci za proračun cijene električne energije za vjetroelektoranu**

Investicijski troškovi kod ovog tipa elektrana su vrlo visoki te su s vrijednošću 1800 €/kW najveći nakon nuklearne elektrane. Radni vijek ovih elektrana je najmanji od sva četiri tipa analiziranih elektrana te iznosi 20 godina. Što se tiče prosječnog iskorištenja instalirane snage, ono je vrlo malo te značajno ovisi o lokaciji na kojoj je vjetroelektrana izgrađena. Za ovaj proračun je uzeta vrijednost prosječnog iskorištenja instalirane snage od 28 %, makar je i ta vrijednost vrlo moguće previsoka.



Kada se vrijednosti ulaznih podataka za proračun cijene električne energije unesu u jednadžbu (1), dobiva se cijena električne energije za vjetroelektranu od 7,38 €cent/kWh. Iz ovoga se vidi da, iako kod ovih elektrana ne postoji trošak goriva, visoki investicijski troškovi te nisko prosječno iskorištenje instalirane snage rezultiraju cijenom električne energije koja je viša i od termoelektrane na ugljen i od nuklearne elektrane, ako se ne uzimaju eksterni troškovi u obzir.

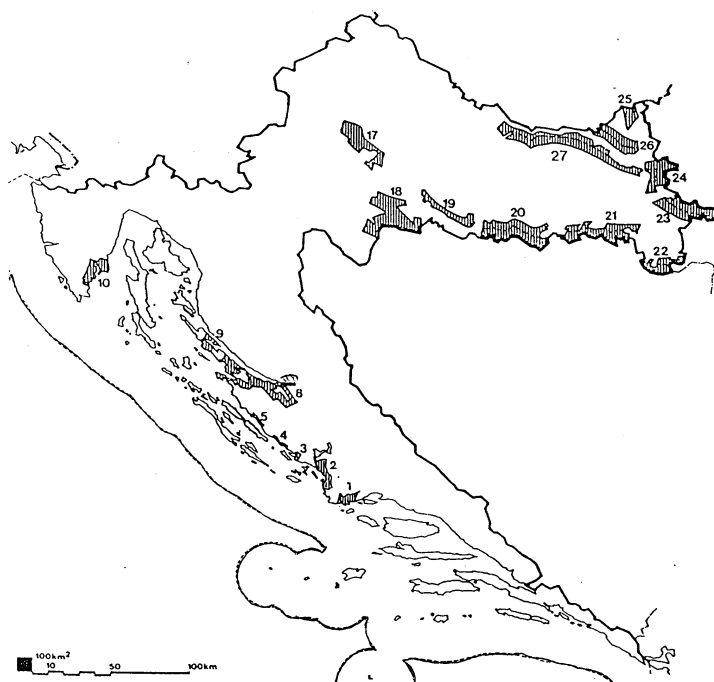
Eksterni troškovi za vjetroelektrane su vrlo niski te ne mijenjaju pretjerano cijenu električne energije. Uzet će se eksterni troškovi u vrijednosti od 0,5 €cent/kW [16]. Cijena električne energije s uključenim eksternim troškovima iznosi 7,88 €cent/kWh što pokazuje da su vjetroelektrane u kontekstu cijene električne energije konkurentne ostalim tipovima elektrana koji se obrađuju u ovom radu.

## 5. PRIJEDLOG IZGRADNJE ELEKTRANA

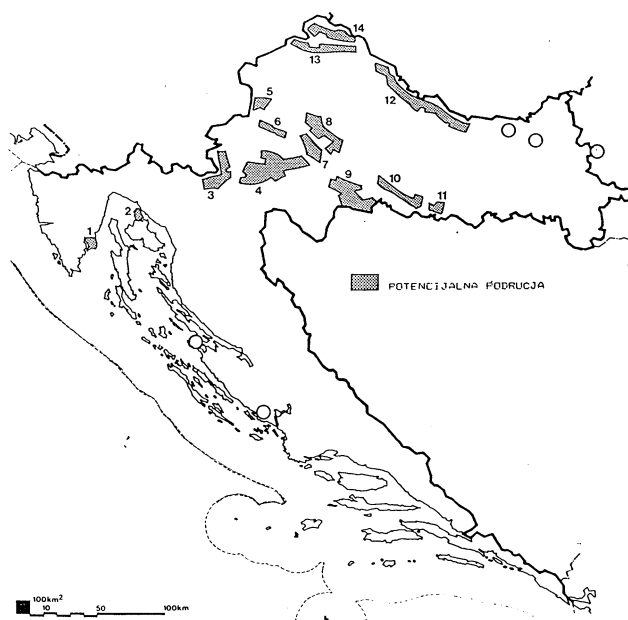
U drugom poglavlju ovoga rada je prikazan način na koji je pretpostavljena potreba za električnom energijom u Hrvatskoj u sljedećih 20 godina. Kako bi pokrili povećanu potrošnju vlastitom proizvodnjom, potrebno je graditi elektrane. U ovom poglavlju će biti dan prijedlog izgradnje elektrana za vremensko razdoblje od 2010. do 2020. godine i od 2020. godine do 2030. godine.

### 5.1. Prijedlog izgradnje elektrana od 2010. do 2020. godine

Kako je navedeno u drugom poglavlju ovog rada, u periodu od 2010. do 2020. godine, većina sadašnjih termoelektrana izlazi iz pogona. Uz to, nove elektrane će trebati pokriti i povećanu potrošnju u tom razdoblju pa će ukupna potrebna snaga novih elektrana iznositi 1900-2100 MW. Već je spomenuto da u Strategiji energetskog razvoja Republike Hrvatske, radi optimističnije pretpostavke povećanja potrošnje električne energije, potrebna snaga je uzeta najmanje 2400 MW. Pored toga, u Strategiji je već točno određena i snaga pojedinih vrsta elektrana koje bi se trebale graditi pa se tako očekuje izgradnja termoelektrana na ugljen ukupne snage od barem 1200 MW te izgradnja kombiniranih termoelektrana na plin ukupne snage također od barem 1200 MW do 2020. godine [5]. Radi zabrane planiranja nuklearne elektrane do 2015. godine, ona nije uzeta u obzir u ovom razdoblju. Bitno je primjetiti da, iako ista zabrana vrijedi i za termoelektranu na ugljen, planovi za izgradnju iste se ipak provode. Pri planiranju izgradnje elektrana bilo bi dobro držati se brojki koje su navedene u Strategiji pošto država ima odlučujuću ulogu pri donošenju konačne odluke. Što se tiče termoelektrana na ugljen, idealno bi bilo izgraditi 2-3 elektrane snage 300-400 MW, a ista stvar vrijedi i za kombiniranu termoelektranu na plin. Na sljedećim slikama (Slika 7. i Slika 8.) su prikazane mape potencijalnih lokacija za izgradnju termoelektrana na ugljen i plin. Valja napomenuti kako bi najbolje bilo termoelektranu na ugljen graditi uz morsku obalu radi svih dodatnih prednosti navedenih u poglavlju 3.



**Slika 7. Mapa potencijalnih lokacija za izgradnju termoelektrane na ugljen [17]**



**Slika 8. Mapa potencijalnih lokacija za izgradnju kombinirane termoelektrane na plin [17]**

Što se tiče vjetroelektrana, bitno je primjetiti da zadnjih godina sve više raste njihov broj, a daljnji porast broja vjetroelektrana je izvjestan i u razdoblju do 2020. godine. Time se olakšava postizanje cilja napomenutog u strategiji energetskeg razvoja Republike Hrvatske da do 2020. godine, udio proizvodnje električne energije iz velikih hidroelektrana i obnovljivih izvora energije u ukupnoj potrošnji električne energije održava na postojećoj razini te da u 2020. godini iznosi 35 %.

## **5.2. Prijedlog izgradnje elektrana od 2020. do 2030. godine**

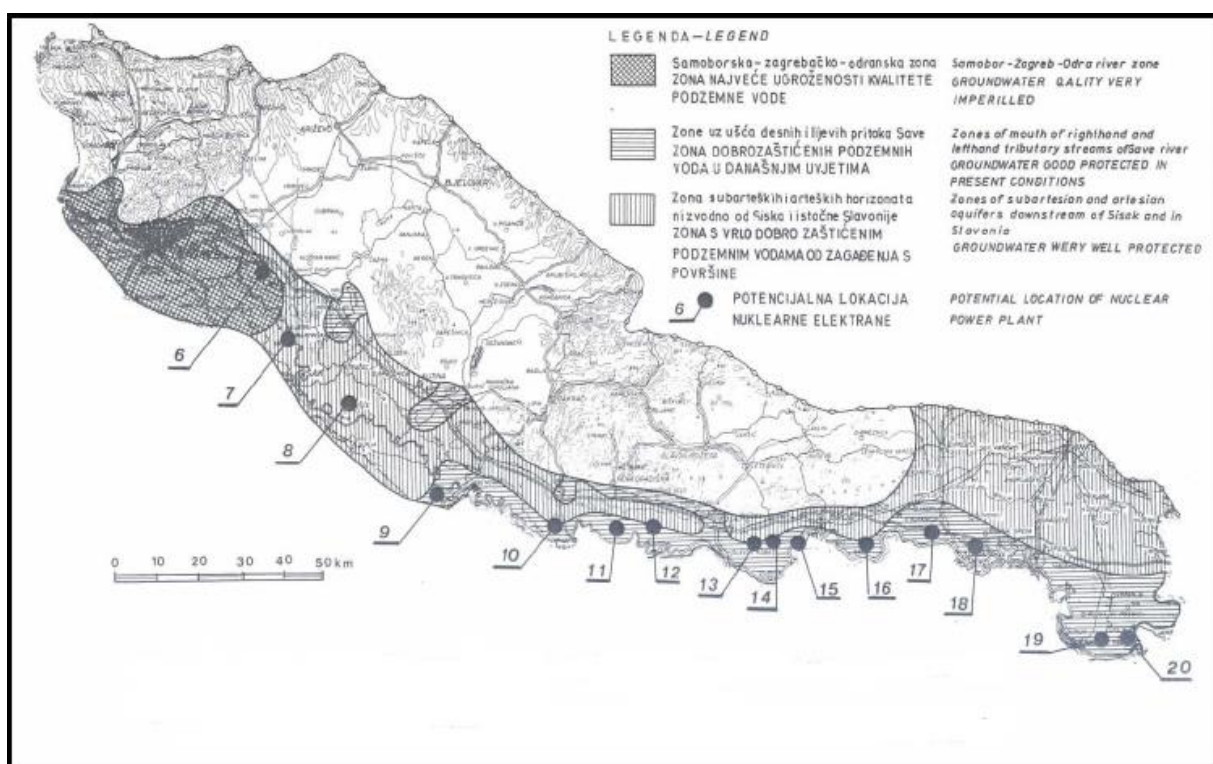
Za razdoblje od 2020. do 2030. godine će biti potrebno izgraditi elektrane ukupne snage 1000-1200 MW s obzirom na povećanu potrošnju predviđenu u drugom poglavlju ovog rada kao i izlazak iz pogona NE Krško. Pošto će u tom razdoblju biti omogućeno planiranje i izgradnja nuklearne elektrane, prijedlog je da se izgradi nuklearna elektrana iz razloga što su konkurentne s obzirom na druge elektrane (kao što je pokazano u četvrtom poglavlju ovoga rada), znatno je manji utjecaj na okoliš od termoelektrana na ugljen i plin i radi svih ostalih već spomenutih prednosti. Također, nuklearne elektrane su bitan element u planiranju razvoja elektroenergetskog sustava te treba napomenuti da već postoje pozitivna iskustva s NE Krško. Kako bi se nuklearna elektrana izgradila do 2030. godine, potrebno je što prije početi s pripremama za izgradnju jer je to dugotrajan proces, što vidimo iz vremena trajanja pripreme gradnje i same gradnje od 12 godina za NE Krško. Nakon što su pregledane opcije za izgradnju nuklearne elektrane, u ovom će radu biti izložen prijedlog izgradnje nuklearne elektrane od tvrtke Areva.

### **5.2.1. Nuklearni reaktor ATMEA 1 tvrtke Areva**

Nuklearni reaktor ATMEA 1 je PWR reaktor nazivne snage 1100 MW. On spada pod generaciju 3+ nuklearnih reaktora što znači da ima slična svojstva u pogledu sigurnosti i utjecaja na okoliš kao i EPR reaktor. Ova vrsta reaktora nudi visoku razinu konkurentnosti u odnosu na druge vrste elektrana zbog smanjenih cijena proizvodnje električne energije. ATMEA 1 reaktor je razvijen i konstruiran od strane tvrtki Areva i Mitsubishi Heavy Industries. Što se tiče sigurnosti, ovi reaktori su otporni na udare aviona i potrese, povećana je sigurnost u slučaju topljenja jezgre (dodan je poseban odjeljak koji izolira jezgru za vrijeme rastapanja).

U smislu konkurentnosti, prosječno iskorištenje instalirane snage je povećano (kraće vrijeme remonta, izdržljivije komponente), smanjena je potrošnja goriva i povećan je termički stupanj iskoristivosti. Životni vijek ovih reaktora iznosi 60 godina [18].

Najbolje lokacije za izgradnju nuklearne elektrane su na rijekama koje služe za hlađenje u kondenzatorima. Od hrvatskih rijeka, kao potencijalna lokacija za izgradnju nuklearne elektrane konkuriraju samo Dunav, Sava i Drava. Na sljedećoj slici (Slika 9.) prikazan je primjer potencijalnih lokacija za izgradnju nuklearne elektrane na rijeci Savi [19].



**Slika 9. Mapa potencijalnih lokacija za izgradnju nuklearne elektrane na rijeci Savi [19]**

Za kraj, bitno je napomenuti da je snaga predloženog nuklearnog reaktora ATMEA 1 prevelika za potrebe Republike Hrvatske iz razloga što je potrebno imati barem još jednu elektranu te snage u rezervi kada nuklearna elektrana izađe iz pogona radi remonta ili nekog drugog razloga. Zbog toga bi vjerojatno bilo puno bolje izgraditi nuklearnu elektranu u dogovoru s nekom od susjednih država pri čemu bi Hrvatska bila vlasnik jedne polovice elektrane kao što je slučaj s NE Krško.

## 6. ZAKLJUČAK

U ovome radu je izvršena analiza četiri vrste tehnologija za proizvodnju električne energije u Republici Hrvatskoj. Za svaku od elektrana je napravljena tehnoe ekonomska analiza, a kako bi se prikazala konkurentnost pojedine elektrane, izračunate su cijene proizvedene električne energije u životnom vijeku elektrane za svaki od četiri tipa elektrana.

Kako bi mogli odrediti potrebnu snagu pojedine elektrane u sljedećih 20 godina, pretpostavljena je potreba za električnom energijom, uzimajući u obzir rezultate u posljednjih 20 godina. Pokazano je da je stopa porasta BDP-a usko povezana uz stopu porasta potrošnje električne energije iz čega se zaključuje da se očekivani rast BDP-a ne može ostvariti ako se ne ulaže u izgradnju novih elektrana. U radu je također naglašena važnost potrebe za novim proizvodnim kapacitetima u Republici Hrvatskoj u narednih 20 godina kako bi se mogli zamijeniti proizvodni kapaciteti elektrana koje izlaze iz pogona te pokriti povećana potrošnja električne energije, a da se ne poveća ovisnost Republike Hrvatske o uvozu električne energije.

Uzimajući u obzir Strategiju energetskog razvoja Republike Hrvatske, dan je prijedlog izgradnje elektrana u sljedećih 20 godina. Važno je napomenuti da stvarna potreba za električnom energijom u navedenom periodu može biti i mnogo veća od vrijednosti pretpostavljenih u ovome radu, no ne treba isključiti mogućnost i da bude manja. Zaključno, uzimajući u obzir navedeno, u svakom slučaju je potrebno izgraditi elektrane instalirane snage minimalno koliko je predloženo u ovome radu.

## LITERATURA

- [1] Feretić, D., Neki temeljni problemi proizvodnje električne energije u Hrvatskoj u kratkoročnom i srednjeročnom razdoblju, *Energija*, 2006., Vol.55 No.1, str. 36-71
- [2] Međunarodna agencija za energiju, dostupno na: <http://www.iea.org/statistics/statisticssearch/report/?&country=CROATIA&year=2011&product=ElectricityandHeat>
- [3] Međunarodni monetarni fond, dostupno na: [http://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2011/02/weodata/weorept.aspx?sy=1992&ey=2016&scsm=1&ssd=1&sort=country&ds=.&br=1&pr1.x=44&pr1.y=8&c=960&s=NGDP\\_R&grp=0&a=](http://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2011/02/weodata/weorept.aspx?sy=1992&ey=2016&scsm=1&ssd=1&sort=country&ds=.&br=1&pr1.x=44&pr1.y=8&c=960&s=NGDP_R&grp=0&a=)
- [4] Radmilović, B., Bajs, D., Majstrovic, G., Majstrovic, M., Mogući razvoj 220 i 400 kV, superponirane mreže hrvatske do 2030. godine, Energetski institut Hrvoje Požar, 2003.
- [5] Strategija energetskog razvoja Republike Hrvatske, dostupno na: [http://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2009\\_10\\_130\\_3192.html](http://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2009_10_130_3192.html)
- [6] World Coal Association, dostupno na: <http://www.worldcoal.org/coal/uses-of-coal/coal-electricity/>
- [7] Biofuels Watch, dostupno na: <http://www.biofuelswatch.com/ccs-economics/>
- [8] Bogdan, Ž., Živković, S., Dokmanović, V., Merić, J., Tehnologije čistog ugljena u strategiji razvoja elektroenergetskog sustava, *Energija*, 2007., Vol.56 No.4, str. 398-431
- [9] Tomšić, Ž., Debrecin, N., Vrancin, K., Eksterni troškovi proizvodnje električne energije i njihovo uključanje u politiku zaštite okoliša, *Energija*, 2006., Vol.55 No.2, str. 128-163
- [10] *Energija u Hrvatskoj 2011*, dostupno na: [http://www.eihp.hr/hrvatski/projekti/EUH\\_od\\_45/EUH11web.pdf](http://www.eihp.hr/hrvatski/projekti/EUH_od_45/EUH11web.pdf)
- [11] World Nuclear Association, dostupno na: <http://www.world-nuclear.org/Nuclear-Basics/>
- [12] Energy resources: nuclear energy, dostupno na <http://openlearn.open.ac.uk/>
- [13] Generation III reactor, dostupno na: [http://en.wikipedia.org/wiki/Generation\\_III\\_reactor](http://en.wikipedia.org/wiki/Generation_III_reactor)
- [14] European Wind Energy Association, dostupno na: <http://www.ewea.org/policy-issues/economics/>

- [15] Butti, G., Papaemmanounil, A., Andersson, G., External Costs of Power Production in South Eastern Europe, dostupno na:  
[http://www.eeh.ee.ethz.ch/uploads/tx\\_ethpublications/papaemmanouil\\_wseas\\_korfu\\_oct\\_2008.pdf](http://www.eeh.ee.ethz.ch/uploads/tx_ethpublications/papaemmanouil_wseas_korfu_oct_2008.pdf)
- [16] EN 35 External Costs of Electricity Production, European Environment Agency, dostupno na: <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/en35-external-costs-of-electricity-production-1/en35>
- [17] Enerpedia, dostupno na:  
[http://powerlab.fsb.hr/enerpedia/index.php?title=PLANIRANJE\\_RAZVOJA\\_ENERGE\\_TSKOG\\_SUSTAVA](http://powerlab.fsb.hr/enerpedia/index.php?title=PLANIRANJE_RAZVOJA_ENERGE_TSKOG_SUSTAVA)
- [18] Areva, dostupno na: <http://www.areva.com/EN/global-offer-418/atmea1-a-pressurized-water-reactor-for-all-networks.html>
- [19] Mayer, D., Velić, J., Lenartić, S., Hidrogeološki i inženjerskogeološki kriteriji za izbor lokacija nuklearnih elektrana-Primjer sliva Save u Hrvatskoj, Rudarsko-geološko-naftni zbornik, 1991., Vol.3, str. 29-34